

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ В ВАКУУМЕ МАКЕТА ЧАСТОТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

### Введение

Электрические ракетные двигатели (ЭРД) и установки (ЭРДУ) открывают новые перспективные направления в космическом двигателестроении. Создаваемые на их основе системы для маневрирования и изменения орбиты космических аппаратов (КА), взамен химических и газовых ракетных двигателей, находятся под постоянным вниманием разработчиков КА. В последние годы, в связи с тенденцией к переходу на космические аппараты малой массы (десятки килограммов), необходимо конструирование и изготовление электроракетных двигателей для ориентации и маневрирования с гораздо меньшими массогабаритными параметрами с сохранением их высоких удельных характеристик [1].

Отличительными свойствами ЭРД и ЭРДУ на их основе являются: высокая скорость истечения рабочего тела (10-100 км/с), чему соответствует удельная тяга -  $10^3 \div 10^4$  с при низкой тяговооруженности; и независимость источника энергии и рабочего вещества (возможность использования для создания импульсов тяги электрической мощности от энергоустановки полезной нагрузки КА, как во время ее транспортировки, так и после доставки ее на орбиту назначения).

Переход на двигатели электрической тяги, имеющие удельный импульс более 1000 секунд, позволяет резко уменьшить необходимую массу рабочего тела. Кроме того, применение ЭРД ввиду более низких уровней тяг будет более предпочтительным для обеспечения поддержания наведения антенн на землю с точностью до 0,1 градуса, а в перспективе до 0,01 градуса, так как антенны спутника связи принимают и излучают электромагнитные волны в виде узкого сфокусированного пучка.

Однако на пути создания и применения ЭРД для таких систем необходимо разрешить ряд трудностей следующего порядка:

1. Органически увязать параметры энергопотребления ЭРД, зависящих от его схемных особенностей, с уровнем располагаемой мощности бортовой энергетической установки.
2. Используемые в ЭРД рабочие тела (РТ) должны быть экологически чисты, не дефицитны, и иметь приемлемые цены.
3. Обеспечить электромагнитную совместимость разрядных процессов в ЭРД с бортовым радиотехническим комплексом.

В зависимости от механизма ускорения рабочего тела различают три основных типа ЭРД: электронагревные (электротермические), электромагнитные (плазменные), электростатические (ионные). В Институте электрофизики Уральского отделения Российской Академии наук (ИЭФ УрО РАН) проводятся исследования нового типа импульсных ЭРД так называемого электронно-детонационного типа [2], основным механизмом генерации ускоренной плазмы

в котором является электростатический разлёт заряженного поверхностного проводящего слоя материала диэлектрика в процессе формирования высоковольтного вакуумного перекрытия на фронте пробоя и непосредственно вблизи его при напряжениях порядка ста и более киловольт.

При исследованиях в ИЭФ УрО РАН наносекундного объемного и поверхностного разрядов с анода в твердых диэлектриках была установлена качественная аналогия между этими процессами и явлением детонации взрывчатых веществ (ВВ). При объемном импульсном пробое [2] аналогом является процесс в детонационном шнуре, а при поверхностном разряде – процесс скользящей детонации в тонком слое ВВ.

Как в том, так и в другом случае признаками этих процессов являются:

- постоянство скоростей детонации ВВ и наносекундного разряда в диэлектрике;
- квадратичная зависимость термодинамических параметров вещества за фронтом фазового перехода (ФФП) "твердое тело – плазма";
- различие этих параметров у вещества за ФФП и за его пределами.

Последний признак проявляется в существенном различии скоростей истечения плазмы, образовавшейся на этих участках процесса. Основное различие между этими процессами состоит в том, что при детонации ВВ ударная волна поддерживается за счет энергий экзотермических реакций, а при импульсном разряде – электрической инжекцией собственных валентных электронов диэлектрика - электронная детонация (ЭД).

Следствием особенностей ЭД-процесса являются специальные требования к параметрам импульса напряжения, виду разрядного промежутка и свойствам РТ, отличающиеся от соответствующих требований, характерных для импульсных плазменных двигателей (ИПД) абляционного типа (абляция- испарение вещества с поверхности под действием теплового излучения горячей над ней электрической дуги).

В ЭРД абляционного типа, в которых не используются дополнительные системы электромагнитного ускорения плазмы, скорость ее истечения определяется тепловыми скоростями ионов и соответствует 3÷5 км/с.

В ЭД-процессе при разряде с анода электронная проводимость плазмы на фронте пробоя, распространяющемся в сторону катода, обеспечивается за счет непрерывной взрывной инжекции в плазму собственных валентных электронов рабочего тела. В результате степень ионизации вещества и масса образовавшейся плазмы  $m_n$  должна зависеть от величины тока смещения распространяющегося анодного разряда, замыкающего ток проводимости.

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt} + U \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

Соответственно эффективность ЭД-процесса будет возрастать с увеличением напряжения и крутизны фронта импульса ( $dU/dt$ ), величины емкости разрядного промежутка и скорости ее изменения в процессе разряда.

Этим условиям, в первую очередь, удовлетворяет переход от импульсов микросекундной длительности к наносекундным импульсам высокого напряжения, при которых, наряду с увеличением  $dU/dt$ , возрастает и напряжение воз-

никновения разряда  $U_0$ , что приводит к квадратичной зависимости скорости распространения разряда с анода вдоль поверхности РТ -  $V_{PA} = f(U_0^2)$ .

$$V_{PA} \cong a \cdot U_0^2 \quad (2)$$

В результате токи и поверхностные плотности токов при воздействии наносекундных импульсов напряжения ( $U \geq 100$  кВ) возрастают на три и более порядка по сравнению с микросекундными импульсами напряжения, а скорость истечения плазмы в этом процессе достигает величины 100-400 км/с

## 1. Механизм ускорения продуктов истечения в ЭРД ЭД-типа

Механизм ускорения плазмы, возникающей при скользящем наносекундном разряде с анода, по существующим в настоящий момент представлениям, – электростатический. Данное явление объясняется тем, что в силу разной подвижности электронов и ионов плазма в зоне интенсивной ионизации приобретает избыточный положительный заряд, величина которого ограничена законом Пуассона. В свою очередь, в результате изъятия валентных электронов из РТ и уход их на анод, поверхность также приобретает избыточный положительный заряд. В результате создаются условия для возникновения сил электростатического отталкивания одноименных зарядов.

В этом случае величину заряда  $q$ , необходимого для электростатического ускорения плазмы, в модели плоского конденсатора можно оценить по порядку величины с использованием экспериментальных данных как

$$q = (32\pi\epsilon_0^2 \cdot S_0 \cdot U \cdot V_n \cdot P_i)^{\frac{1}{3}} = 2.92 \cdot 10^{-7} (R^2 \cdot U \cdot V_n \cdot P_i)^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

где  $R$ ,  $U$ ,  $V_n$ ,  $P_i$  – соответственно, радиус поверхности РТ, напряжение, скорость плазмы и импульс тяги (в системе СИ). При этом расчетная величина заряда  $q$  не превышает располагаемый заряд  $Q$  источника питания.

## 2. Источники электропитания ЭДРД

В представленной работе был изготовлен и испытан в вакууме макет генератора высоковольтных импульсов наносекундной длительности для питания ИЭДРД, параметры которого по длительности импульса, напряжению и запасаемой энергии соответствовали изложенным выше теоретическим соображениям. В таблице приведена характеристика вакуумного макета и сравнение его с параметрами нескольких генераторов, изготавливаемых в ИЭФ [3], [4].

# Характеристика вакуумного макета и сравнение его с параметрами других генераторов

Тип, марка ГИН	$R_{ант}$ , Ом	Амплитудное напряжение, кВ		Длит. импульса, нс	$t_{ф}$ , нс	Запасаемая энергия, Дж/имп.	Частота следования, Гц
		$U_1$	$U_2$				
РАДАН-220	25	120	220	2,0	0,1	1,2	2
СМ-2Н	500	150	80÷300	50	5,0	0,5	100
Вакуумный макет	25	70	140	2	0,5	0,7	30

$U_1$  – при работе на согласованную нагрузку;

$U_2$  – режим холостого хода;

$t_{ф}$  – длительность фронта импульса.

## 3. Методика измерений.

### 3.1. Электрические измерения.

Для измерений импульсов напряжения и тока в непосредственной близости к разрядному промежутку разрядной камеры (РК) были установлены делитель напряжения, одновременно играющий роль частичной нагрузки для ГИН, и токовый шунт. Принципиальная электрическая схема этих датчиков приведена на рис. 1.

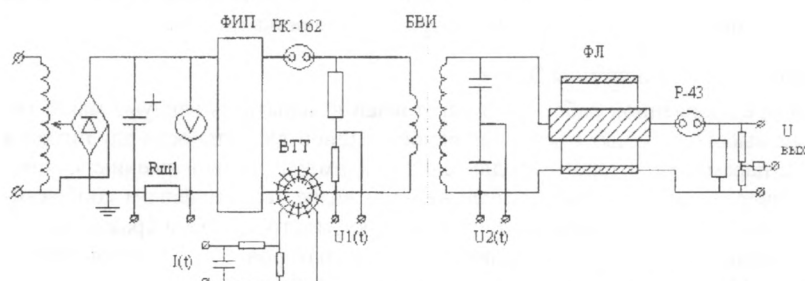


Рис. 1. Электрическая схема датчиков напряжения и тока

При изготовлении и размещении делителя напряжения и токового шунта были учтены требования по обеспечению необходимой широкополосности, а именно чтобы их элементы и конструкция обеспечивали высококачественную и неискажённую передачу коротких фронтов импульса ( $< 0,5$  нс), а также надёжность при воздействии высокого напряжения импульсов, достигающего 150 кВ. Резисторы ТВО-2, использованные в делителе напряжения, обеспечивают сохранение своих параметров под действием градиента напряжения до 50 кВ/см при его длительности до 100 нс, в течение 30-40 тысяч импульсов, что вполне допустимо для исследовательских целей.

Регистрация сигналов тока и напряжения производилась в двухканальном режиме цифровым запоминающим осциллографом Tektronics TDS-644B. Получаемые осциллограммы тока и напряжения показывают, что полоса пропускания измерительного тракта, включая токовый шунт и делитель напряжения, не менее 500 МГц.

Примеры осциллограмм напряжения и тока высоковольтного импульсного ГИН для активной резистивной нагрузки 25 Ом (близкой к согласованной нагрузке), которые зарегистрированы с помощью двухканального цифрового запоминающего осциллографа Tektronics TDS-644B, даны на рис. 2.

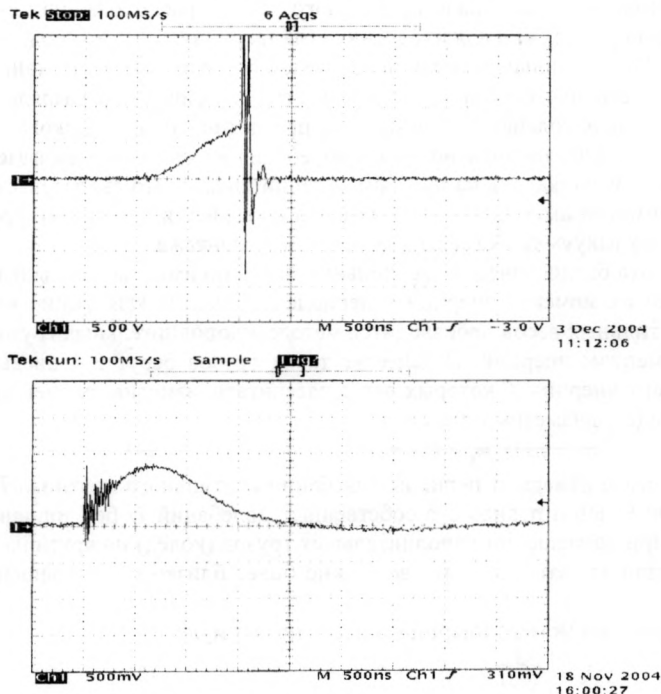


Рис. 2. Примеры осциллограмм напряжения и тока для активной резистивной нагрузки 25 Ом

### 3.2. Измерения импульса тяги.

Для измерений импульса тяги ЭРД при уровнях 10-500 мкН·с используются различные методы – трифилярный подвес, метод баллистического маятника, метод баллистических крутильных весов. В наших условиях (величина импульса тяги  $P = 5-20$  мкН·с) оказалось удобно использовать надёжный метод непосредственного измерения тяги с применением баллистических крутильных весов. При этом макет ИЭРД подвешивался в вакуумной камере на упругом подвесе типа крутильного маятника на тонкой вольфрамовой нити толщиной 0,2 мм длиной порядка 1 м. Питание генератора напряжениями бортовой сети

15 В и 120 В осуществлялось через 3 жидкометаллических контакта, обеспечивающих малую паразитную упругость и механическое затухание. Высоковольтные импульсы от ГИН поступали на электроды разрядной камеры, смонтированной непосредственно на выходе высоковольтного генератора.

Контакт с жидким металлом осуществлялся через короткие молибденовые стержни диаметром 0,5 мм. Для уменьшения влияния трения контактов в жидком металле все элементы - нити подвеса и три контактных стержня устанавливались соосно, что и составляло сущность правильной установки и наладки этого измерителя. На зеркало 4 падает луч света, и отраженный световой зайчик на измерительной шкале из матового стекла, расположенной снаружи вакуумной камеры, служил для измерения угла закручивания нити подвеса.

Настройка крутильных весов проверялась по декременту затухания. При правильной настройке коромысло весов после электрического разряда совершало 10-12 полных колебаний. Кроме того, при подаче электрического разряда на разрядную камеру на обратном ходе колебания весов (в противофазе) весы полностью останавливались на нулевом делении шкалы, что свидетельствует о воспроизводимости импульса тяги от разряда к разряду и отсутствии вредного влияния стенок вакуумной камеры и конструкции монтажа.

Тарировка баллистических крутильных весов по импульсу силы основана на измерении их момента инерции и периода колебаний. Измерение момента инерции крутильных весов производится методом дополнительных грузов с известным моментом инерции. В качестве таких грузов берут 3-4 диска, либо кольца, момент инерции  $J_k$  которых легко рассчитать, измерив их внешний ( $d_2$ ) и внутренний ( $d_1$ ) диаметры и массу  $m$ :

$$J_k = 0.125 \cdot m_k \cdot (d_1^2 + d_2^2) \quad (4)$$

После этого измеряют периоды колебаний крутильного маятника  $T_2$  с каждым из этих колец и период его собственных колебаний  $T_0$  без дополнительного груза. При размещении дополнительных грузов (колец) на крутильные весы нужно устанавливать их центр возможно более близко к оси вращения весов.

Рассчитываем момент инерции  $J_0$  весов по формуле:

$$J_0 = \frac{J_{k1}}{\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 - 1} \quad (5)$$

Полученные по этой формуле значения  $J_0$  для каждого из дополнительных грузов усредняем:

$$J = \left( \frac{J_{01} + J_{02} + J_{03} + K}{n} \right) \quad (6)$$

Расчет импульса отдачи  $m \cdot v$ :

$$m \cdot v \cdot r = J \cdot \omega$$

где  $\omega = \alpha \cdot 2\pi/T_0$  — угловая скорость коромысла весов после силового воздействия;  $\alpha$  — максимальный угол закручивания нити, причем  $\alpha = \Phi/2$  ( $\Phi$  — угол поворота светового указателя) из-за удвоения угла после отражения от зеркала.

$$p = m \cdot v = \frac{J \cdot w}{r} \quad (7)$$

Отсюда

$$T^0 = 2\pi \sqrt{\frac{Y_0}{k}}; T_{k1} = 2\pi \sqrt{\frac{Y_0 + Y_{k1}}{k}}; \frac{T_{k1}^2}{T_0^2} = \frac{Y_0 + Y_{k1}}{Y_0},$$

где  $k$  — упругость подвеса.

#### 4. Результаты измерений

При подаче на разрядную камеру высоковольтных импульсов с частотой 2 Гц в количестве 10, 20 и 30 импульсов получены отклонения светового указателя 1, 2 и 3 мм, что даёт по вышеприведенным формулам значение импульса отдачи 30, 55 и 80 мкН·с соответственно. Это соответствует величине механического импульса 3мкН·с на один разряд.

В настоящее время производится доработка генератора для работы с частотами до 30 Гц и измерения массового расхода и оценки интегральной скорости плазменного пучка, создаваемого этим двигателем, а также дальнейшее усовершенствование методики измерений для оценки таких важных эксплуатационных параметров, как электрический КПД и дифференциальное измерение скорости ионного пучка, и её распределение в зависимости от типа и заряда ионов. Необходима также оценка воспроизводимости импульса тяги в зависимости от частоты включений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Burton R. L. ЭРД для КА. Electric propulsion / Burton R. L. // *Aerosp/ Amer* 1998 36, № 12. С. 62-63.
2. Вершинин Ю. Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков / Ю. Н. Вершинин. Екатеринбург: УрО РАН, 2000.
3. Импульсные ускорители. / отв. ред. Л.А. Арцимович. М.: Машиностроение, 1972. С. 230-233.
4. Любутин С. К., Рукин С. Н., Славиковский Б. Г., Цыранов С. Н. // *ПТЭ*. 2000. №1. С. 74-86.
4. Mesyats G. A., Shpak V.G., Yalandin M. I., Shunailov S. A. Compact highcurrent accelerations based on the RADAN // *Pros. IEEE Intern. Pulsed Pow. Conf.* 1993. Pp. 835-838.
5. Иванов А.Б. Измерительный маятник с линзой в центре масс / А.Б. Иванов // *ПТЭ*. 1990. Вып.4, С. 203.